

4. Таранчук В.Б. Особенности функционального программирования интерактивных графических приложений // Вестник самарского государственного университета. 2015. №6(128). С. 178-189.

5. Сафонов Д.С., Логунова О.С. Структура интерактивной системы автоматизированного проектирования конструкции секций вторичного охлаждения машины непрерывного литья заготовок // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. 2014. №2(5). С. 75-81.

6. Прищепа М.В., Ронжин А.Л. Модели интерактивного взаимодействия с подвижным информационно-навигационным комплексом // Доклады томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2013. №2(28). С. 136-141.

7. Охотниченко А.В., Сибилева Н.С. К вопросу о необходимости разработки лексического анализатора как инструмента ввода формализованной информации // Ab ovo ... (С самого начала...). Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2017. С. 116-118.

8. Логунова О.С., Сибилева Н.С., Павлов В.В. Система интеллектуальной поддержки выбора шихтовых материалов для дуговой сталеплавильной печи: консолидация эмпирической и экспертной информации // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. 2016. Т. 4. № 2. С. 26-31.

9. Logunova O.S., Sibileva N.S. Intelligent support system of steel technical preparation in an arc furnace: functional scheme of interactive builder of the multi objective optimization problem // 3rd International Scientific and Technical Conference on Scientific and Technical Progress in Ferrous Metallurgy. Severstal and Cherepovets State University: IOP Science. 2017. Vol. 287. №012009.

10. Логунова О.С., Филиппов Е.Г., Павлов И.В., Павлов В.В. Стратегия постановки задачи многокритериальной оптимизации состава шихтовых материалов для электродуговой сталеплавильной печи // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2013. № 1. С. 66-70.

УДК 669.162.263

Н. А. Спирин, О. П. Онорин, И. А. Гурин, Л. Лазич, А. С. Истомин

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

ЛОГИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ХОДА ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ

Аннотация

Представлена логико-математическая модель оценки хода доменной плавки. Модель позволяет оценивать распознавания нормального режима работы доменной печи и следующие отклонения от этого режима: излишне развитые газовые потоки (периферийный и центральный); нарушение теплового режима плавки (горячий и холодный ход плавки); нарушение

ровного схода шихты в печи (тугой ход, верхнее и нижнее подвисяние шихты). Отражены функциональные возможности разработанного программного обеспечения.

Ключевые слова: доменное производство, информационно-логическая система, разработка программного обеспечения, диагностика хода доменной плавки.

Abstract

The logical-mathematical evaluation model of blast-furnace melting operation is represented. The model provides an opportunity to evaluate the normal operation mode of blast furnace and further deviations from this mode such as overdeveloped gas flows (peripheral and central), violation of thermal melting conditions (hot and cold course of melt), violation of smooth descent of burned materials in the furnace (tight furnace operation, higher and lower suspension of burden). The functional capabilities of developed software are represented.

Key words: blast-furnace production, information logical system, software development, blast-furnace melting operation diagnostics.

Введение. Для совершенствования технологии выплавки чугуна и решения задач управления такими сложными и энергоёмкими технологическими агрегатами как доменные печи должны использоваться интеллектуальные системы управления [1-10]. Современный процесс выплавки чугуна в доменной печи подвержен влиянию многих переменных контролируемых и неконтролируемых факторов, которые вызывают нарушения хода доменной плавки. Одним из способов диагностики и управления ходом доменной печи является использование экспертных систем, включающих в себя как детерминированные знания о процессе, так и формализованный практический опыт специалистов-доменщиков. Анализ состояния вопроса по реально используемым математическим моделям в практике управления доменной плавкой в режиме реального времени позволяет констатировать, что в настоящее время такие методы и соответствующее программное обеспечение практически не разработаны, что определяет актуальность работы [8-10].

Распознавание нормального режима работы доменной печи. При нормальном режиме работы отклонение по модулю i признака ΔX_i , характеризующего работу печи в базовом X_i^B (заданные значения) и проектном периодах X_i^P не должно превышать допустимого значения $\Delta X_i^{\text{доп}}$, которое является настройкой модели.

$$\Delta X_i = |X_i^B - X_i^P| \leq \Delta X_i^{\text{доп}}. \quad (1)$$

Если условие (1) выполняется («Истина»), то значению i -го идентификатора признака P_i присваивается значение «1», в противном случае («Ложь») – значение «0». При этом все признаки ранжируются. Каждому из них присваивается значение его ранга R_i изменяющегося в диапазоне от «0» до «1», определяемого методом экспертного оценивания.

Вероятность нормальной работы доменной печи (B_n), рассчитывается по следующему соотношению:

$$B_n = \sum_{i=1}^n \left(P_i \times \frac{R_i}{\sum_{i=1}^n R_i} \right) = \sum_{i=1}^n (P_i \times \alpha_i), \quad (2)$$

где α_i – весовой коэффициент i -го идентификатора признака, изменяющийся в диапазоне от 0 до 1; n – число признаков.

Для распознавания нормального режима работы доменной печи значения показателей X_i^B используются для настройки модели и корректируются для условий работы конкретной доменной печи. Число контролируемых признаков, используемых в модели для распознавания нормального режима работы доменной печи, составляет 15. В отличие от известных работ других авторов в данном исследовании осуществляется интеграция комплексов контролируемых признаков и расчетных параметров доменной плавки. В математическом и программном обеспечении используется дополнительно комплекс 9 основных расчетных показателей, используемых в модели доменного процесса и адаптируемых применительно к условиям ММК. Таким образом, число признаков достигает 24.

Основные комплексные расчетные параметры для диагностики хода доменной плавки относятся к следующим [11-13].

- *Тепловой режим* – обобщенные параметры, характеризующие тепловое состояние: верхней (индекс теплового состояния шахты и др.); нижней части доменной печи (теоретическая температура горения, индекс теплового состояния низа: удельная энтальпия продуктов плавки, включая теплоту плавления чугуна, за вычетом теплоты образования шлака (затраты тепла на физический нагрев продуктов плавки и восстановление в чугун оксидов трудновосстановимых элементов по реакциям прямого восстановления чугуна и др.).

- *Газодинамический режим* – степень уравнивания шихты газом в верхней и нижней частях печи, в отдельных кольцевых зонах и др. Прогнозирование и расчет критических газодинамических параметров доменной плавки.

- *Шлаковый режим* – вязкость и политермы вязкости конечного шлака, температура плавления шлака; вязкость шлака при заданной температуре; градиенты вязкости шлака, основности шлака; температура плавления, температурный интервал плавления железорудных материалов и толщина зоны вязкопластичного состояния ЖРМ.

- *Интенсивность проплавки* – объем проплавленной шихты за единицу времени, $\text{м}^3/\text{мин.}$). Основные комплексные параметры (часть из указанных расчетных параметров) использовались в дальнейшем для диагностики хода доменной плавки.

Кроме оценки режимов дополнительно определяют конфигурацию и расположение зоны вязкопластичного состояния железорудных материалов – температуру плавления и температурный интервал плавления железорудных материалов; высоту и толщину зоны вязкопластичного состояния ЖРМ в различных вертикальных элементах доменной печи.

Схема алгоритма распознавания отклонений от нормального режима доменной плавки представлена на рис. 1.

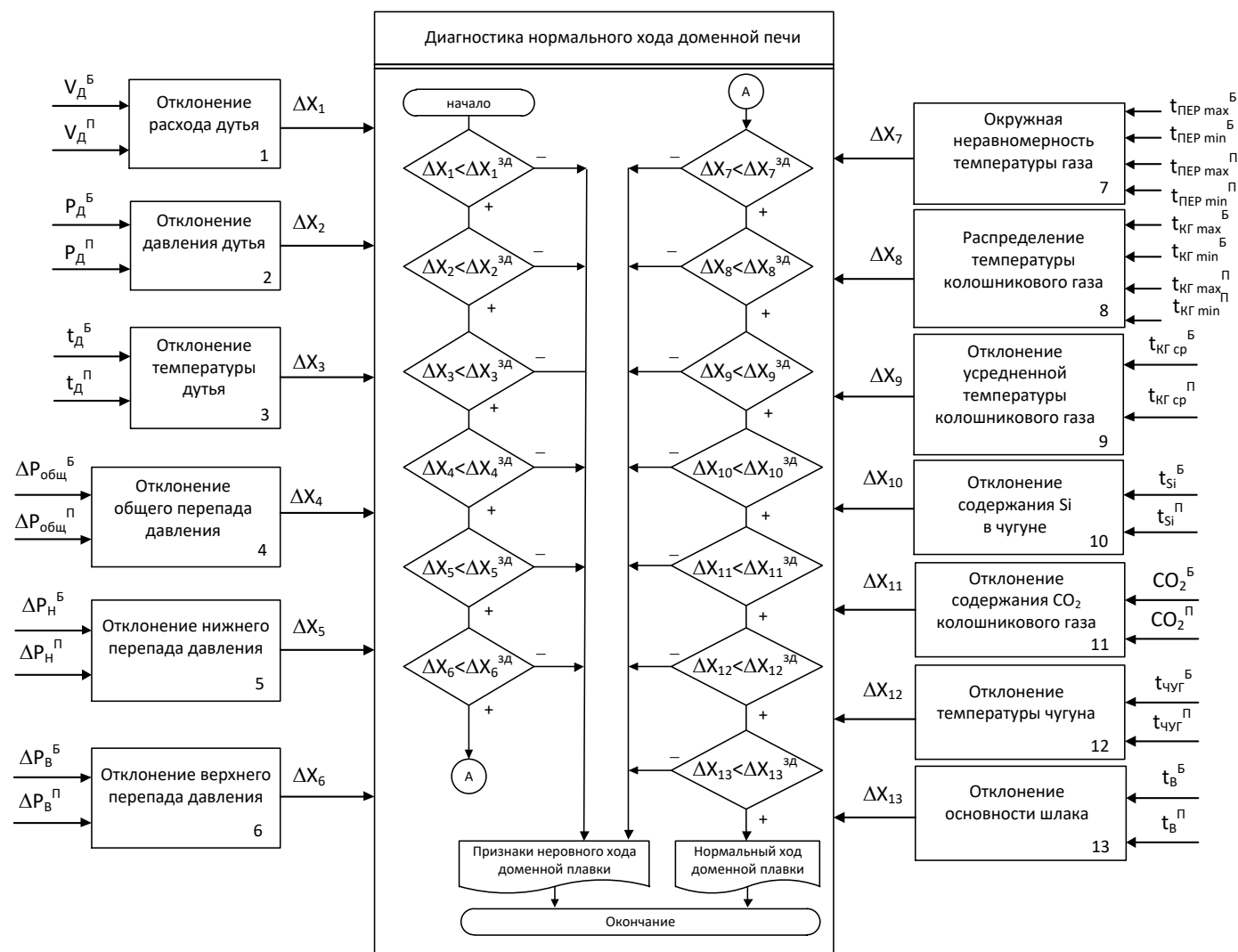


Рис. 1. Фрагмент алгоритма распознавания отклонений от нормального режима доменной плавки

Распознавание отклонений от нормального режима доменной печи. Предусмотрена диагностика следующих отклонений от нормального режима доменной печи:

1. Нарушение устойчивости газового потока (периферийный, центральный газовые потоки).
2. Нарушение теплового режима плавки (горячий и холодный ход плавки).
3. Нарушение ровного схода шихты в печи (подвисяние шихты: верхнее и нижнее, тугой ход).

При этом используется та же методология, что и при оценке нормального хода доменной плавки. Для выявления вида отклонения плавки от нормального режима сочли целесообразным использовать сравнение между собой двух периодов – базового, для которого значения параметров плавки являются настройкой модели и характеризуют его нормальный режим работы. Вторым для распознавания видов отклонения от нормального режима работы доменной печи выбирается проектный период, в котором производится сбор информации в течение 2 часов.

Диагностика нормального хода доменной плавки и видов отклонений от нормального режима доменной плавки, количество контролируемых и расчетных (по модели) параметров для оценки этих режимов представлены в таблице. Таким образом, для оценки хода доменной плавки используется 111 параметров, в том числе 40 комплексных расчетных величин.

Таблица

Количество контролируемых и расчетных (по модели) параметров для оценки нормального хода и видов отклонений от нормального режима доменной плавки

Вид отклонений от нормального режима	Количество контролируемых параметров	Количество комплексных расчетных параметров	Итого
Нормальный ход доменной плавки	15	9	24
Нарушение устойчивости газового потока:			
– периферийный газовый поток;	9	5	14
– центральный газовый поток.	8	5	13
Нарушение теплового режима плавки:			
– горячий ход плавки,	8	4	12
– холодный ход плавки.	8	4	12
Нарушение ровного схода шихты в печи:			
– верхнее подвисяние шихты;	8	4	12
– нижнее подвисяние шихты;	7	4	11
– тугой ход печи	8	5	13
Итого:	71	40	111

Функциональное моделирование. Первым этапом в разработке программного продукта было создание функциональной модели. Ее разработка была выполнена в программе AllFusion Process Modeler (BPwin) по стандарту IDEF0 (Integrated computer aided manufacturing DEFinition). Использование методики IDEF0 позволило создать функциональную структуру программного комплекса, выявить производимые им действия и связи между этими действиями, управляющие воздействия и механизмы выполнения каждой функции, что, в конечном итоге, позволило на ранней стадии проектирования предотвратить возможные ошибки.

Общее количество декомпозированных блоков функциональной модели составляет 90. Фрагмент диаграммы 1-го уровня функциональной модели подсистемы прогнозирования возникновения отклонений в ходе доменной плавки, представленный на рис. 2, включает следующие функции:

- «Осуществить сбор и первичную обработки данных» (A1) обеспечивает автоматическое наполнение системы данными из АСУ ТП и корпоративной информационной системы (КИС).

- «Выявление признаков нормальной работы доменной печи» (A2) обеспечивает пересчёт и анализ признаков отклонения параметров.

- «Определить признаки отклонения от нормального режима доменной плавки» (A3) обеспечивает пересчёт и анализ таких отклонений как: периферийный газовый поток; центральный газовый поток; горячий ход плавки; холодный ход плавки; тугой ход плавки; верхние подвисяние шихты; нижние подвисяния шихты; количество срабатываемых подач.

- «Формирование рекомендаций по технологиям ведение доменной плавки» (A4) на основании выявленных отклонений, происходит формирование рекомендации по корректировке ведения плавки.

Результаты функционального моделирования позволили в дальнейшем перейти к следующим этапам разработки системы – созданию архитектуры и реализации программного обеспечения системы.

На рисунке 3 продемонстрирована архитектура программного обеспечения информационной системы, в которой выделены основные компоненты ее программной реализации.

Программное обеспечение «Распознавание вида отклонений доменной плавки» виде web-приложения разработано в соответствии с современными принципами построения прикладных программ (функциональность, расширяемость, интеграция с базами данных, интуитивно-понятный пользовательский интерфейс, безопасность, оценивание информации). В основе программной реализации лежит технология .NET, что дает дополнительную свободу при выборе платформы, а также языка программирования. Программный продукт написан на языке C# с использованием среды разработки Microsoft Visual Studio 2015.

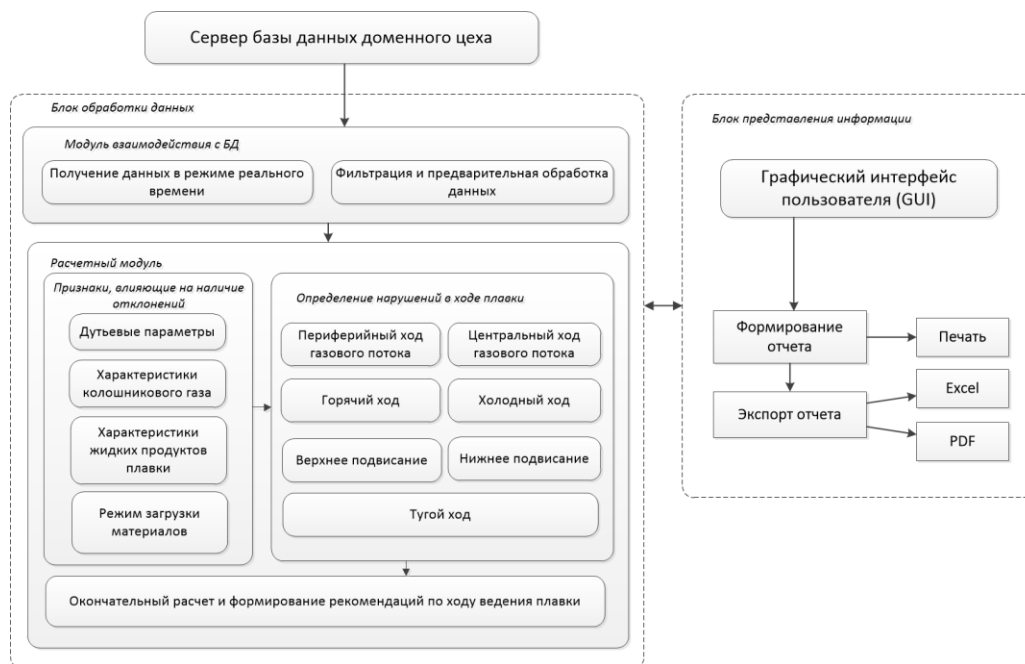


Рис. 3. Архитектура программного обеспечения

Программный модуль является частью системы оптимизации технологического процесса доменной плавки, входит в состав автоматизированной информационной система анализа и прогнозирования производственных ситуаций доменного цеха ПАО «ММК» и предназначен для инженерно-технологического персонала.

В качестве примера на рисунке 4 представлено главное окно программы, в котором отражено состояние работы доменной печи. При анализе учитываются три типа нарушений: нарушения теплового режима, нарушения газового хода и нарушения режима схода шихты. Для каждого из отклонений указано его состояние, а также есть возможность предоставления подробной информации по отклонению. На форме, изображенной на рис. 3, в виде графиков показана информация о параметрах, влияющих на вероятность возникновения определенного отклонения.

Заключение

1. Разработана логико-математическая модель и программный продукт оценки хода доменной плавки, позволяющий пользователю оперативно оценивать ход плавки.

2. Использование компьютерной информационно-логической системы помогает производственному персоналу осуществлять диагностику хода печи в режиме реального времени, а также решать оперативные задачи управления технологией доменной плавки.

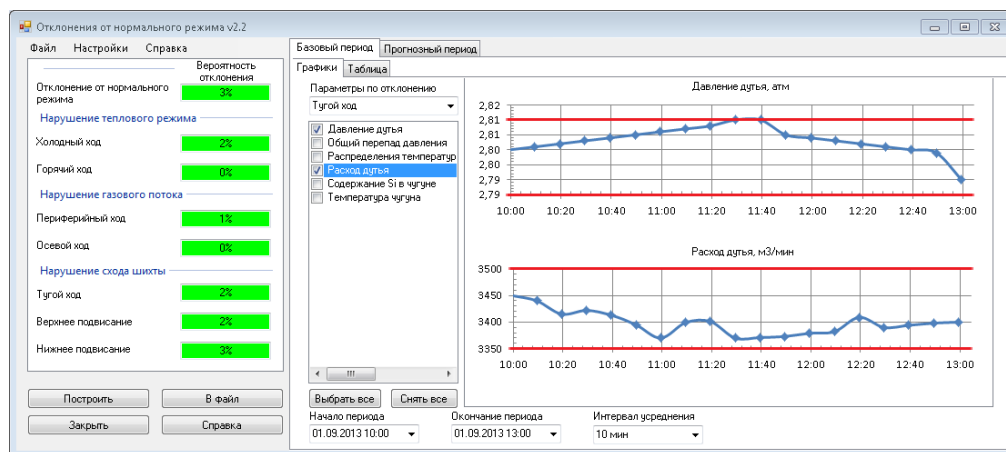


Рис. 4. Фрагмент окна программного обеспечения для распознавания вида отклонений доменной плавки от нормального режима

Список использованных источников

1. Storm P. Using expert systems in blast furnace operation – a few preliminary impressions // International Conference of the Manufacturing Value (Chain). 1998. Vol. 2. Pp. 623-630.
2. Frerichs D.K. Artificial-intelligence for supervisory control and operator decision support // Tappi journal. 1992. Vol. 75. Iss. 6. Pp. 138-141.
3. Применение управляющей системы и искусственным интеллектом в доменном производстве. Application of a techniques to blast furnace operation / O. Lida, S. Taniyochi, T. Hetani // Kawasaki Steel Techn. Dept, 1992, №26. С. 30–37.
4. Yagi J. Recent progress in fundamental and applied researches in blast-furnace ironmaking in Japan // ISIJ International. 1991. Vol. 31. Iss. 5. Pp. 387-394.
5. Vapaavuori E. Application of expert systems and knowledge based systems to support operation of iron blast furnace // Expert systems with applications. 1997. Vol. 12. No. 3. Pp. II.
6. Matsuzaki S., Nishimura T., Shinotake A., Kunitomo K., Naito M., Sugiyama T. Development of mathematical model of blast furnace // Nippon steel technical report. July 2006. No. 94. Pp. 87–95.
7. Iida M., Ogura K., Hakone T. Numerical Study on Metal/Slag Drainage Rate Deviation during blast furnace tapping // ISIJ International. Vol. 49 (2009). No. 8. Pp. 1123–1132.
8. Hera P., Birlan F., Oprescu I., Alexandru E.-M., Hera M. Modeling of metallurgical continuous processes in the blast furnace // U.P.B. Scientific Bulletin, Series B. 2011. Vol. 73. Iss. 4. Pp. 171–182.
9. Ueda S., Natsui S., Ariyama T., Nogami H., Yagi J.I. Recent progress and future perspective on mathematical modelling of blast furnace // ISIJ International, 2010. Vol. 50, No. 7. Pp. 914–923.
10. Bi X., Li P., Peng W. et al. Study on a MES-based large blast furnace expert system // 3rd International Conference on Mechatronics and Intelligent Materials (MIM 2013). Mechatronics and intelligent materials III, PTS 1-3. 2013. Vol. 706-707. P. 1971.

11. Spirin N.A., Lavrov V.V., Rybolovlev V.Yu. et al. Модельные системы поддержки принятия решений в АСУ ТП доменной плавки металлургии // Под ред. Н. А. Спирина. – Екатеринбург: УрФУ, 2011. – 462 с.

12. Spirin N., Gileva L., Lavrov V., Gordon Y., Yaroshenko Yu. The pilot expert system to control blast furnace operation // AISTech 2015 Iron and Steel Technology Conference and 7th International Conference on the Science and Technology of Iron-making, ICSTI 2015 (Cleveland, United States). Code 113707. 2015. Vol. 1. Pp. 1225-1232.

13. Spirin N.A., Lavrov V.V., Rybolovlev V.Yu., Krasnobaev A.V., Pavlov A.V. Use of Contemporary Information Technology for Analyzing the Blast Furnace Process // Metallurgist, 2016. Vol. 60. Iss. 5-6. Pp. 471-477.

УДК 669.162

Н. А. Спирин, О. П. Онорин, И. А. Гурин, В. В. Лавров, К. А. Щипанов
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

СТРУКТУРА СИСТЕМЫ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ СЫРЬЕВЫМИ И ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ РЕСУРСАМИ В ДОМЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Аннотация

Представлена структура модели оптимизации оптимального управления сырьевыми и топливно-энергетическими ресурсами в доменном цехе металлургического комбината. В основу системы положены блоки: 1) расчета комплекса параметров, характеризующих тепловой, газодинамический, шлаковый и дутьевой режимы каждой из доменных печей цеха за базовый период; 2) расчета коэффициентов линеаризованной модели (коэффициентов передачи по различным каналам воздействий) для каждой печи в отдельности свойств железорудного сырья, флюсующих добавок, дутьевых параметров, параметров комбинированного дутья на технико-экономические показатели работы отдельных печей и их тепловой, газодинамический и шлаковый режимы доменной плавки для условий базового с использованием модели доменного процесса УрФУ–ММК; 3) решения задачи оптимального распределения сырьевых и топливно-энергетических ресурсов для проектного периода работы доменных печей; 4) анализа полученных результатов и выдачи рекомендаций по оптимизации параметров доменных печей. Проиллюстрирована разработанная функциональная модель оптимального распределения сырьевых и энергетических ресурсов для инженерно-технологического персонала доменного цеха, определены основные функции и взаимосвязи между отдельными функциональными блоками. Отражены функции созданного программного обеспечения «Оптимальное управление сырьевыми и топливно-энергетическими ресурсами в доменном производстве», реализованного в виде web-приложения в среде программирования Microsoft Visual Studio 2017 (язык программирования C#). Программный продукт позволяет инженерно-технологическому персоналу доменного цеха металлургического комбината решать задачи оптимального распределения топливно-энергетических ресурсов (расхода природного газа и кислорода) в группе доменных печей в различных технологических ситуациях.